

UNIVERZITA KARLOVA V PRAZE

Přírodovědecká fakulta

Katedra aplikované geoinformatiky a kartografie

Studijní program: Geografie (bakalářské studium)

Studijní obor: Geografie - kartografie



Tomáš KLOUČEK

HODNOCENÍ FOTOVOLTAICKÉHO POTENCIÁLU STŘECH NA ÚZEMÍ PRAHA

ASSESSMENT OF PHOTOVOLTAIC POTENTIAL OF ROOFS IN PRAGUE AREA

Bakalářská práce

Praha 2012

Vedoucí bakalářské práce: RNDr. Přemysl Štych, Ph.D.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně a že jsem všechny použité prameny řádně citoval.

Jsem si vědom toho, že případné použití výsledků, získaných v této práci, mimo Univerzitu Karlovu v Praze je možné pouze po písemném souhlasu této univerzity.

Svoluji k zapůjčení této práce pro studijní účely a souhlasím s tím, aby byla řádně vedena v evidenci vypůjčovatelů.

V Praze dne 28. května 2012

.....
Tomáš Klouček

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu mé práce RNDr. Přemyslu Štychovi, Ph.D. za věnovaný čas, cenné rady a připomínky. Dále bych chtěl poděkovat Útvaru rozvoje hlavního města Prahy za poskytnutá data. V neposlední řadě děkuji rodině a přátelům za trpělivost a podporu při psaní práce i v průběhu celého studia.

Hodnocení fotovoltaického potenciálu střech na území Praha

Abstrakt

Hlavní náplní práce je vytvoření algoritmu pro stanovení fotovoltaického potenciálu střech budov pomocí základních nástrojů programu ArcGIS při znalosti digitálního modelu povrchu a vektorové vrstvy zástavby. Pro lepší posouzení vhodnosti umístění je navíc vypočten možný elektrický výkon a návratnost případné investice. Sled použitých nástrojů je vložen pro následné snadné použití do nástroje ModelBuilder. Funkčnost modelu je ověřena aplikací na území Prahy 8, Karlín a vizualizovaná do několika map. Mimo to, je v práci stručně shrnut úvod do problematiky fotovoltaiky a možnosti využití GIS v tomto oboru.

Klíčová slova: Fotovoltaika, GIS, Digitální model povrchu

Assessment of photovoltaic potential of roofs in Prague area

Abstract

The main aim of thesis is creation of algorithm for determination photovoltaic potential roofs of buildings using the basic tools of ArcGIS software for the knowledge a digital surface model and vector layer of built-up area. Possible electrical power and return of investment is also calculated for better assess of the suitability location. The sequence is inserted for easily using into ModelBuilder tools. The functionality of the model is verified by applications in Prague 8, Karlín and it is visualized in several maps. In addition there is a briefly summarized introduction to photovoltaic and possibilities of using GIS in this field in this thesis.

Keywords: Photovoltaic, GIS, Digital surface mode

| OBSAH

Přehled použitých zkratek	7
Seznam obrázků	8
1 Úvod	9
2 Úvod do problematiky.....	10
2.1 Energie a člověk.....	10
2.2 Sluneční záření a přeměna na elektrickou energii.....	11
2.3 Fotoelektrická přeměna (fotovoltaika).....	13
2.3.1 Princip fotovoltaické přeměny	13
2.3.2 Fotovoltaické panely na budovách	15
2.3.3 Modelování PV potenciálu v GIS	18
3 Metodika a data	21
3.1 Metodika	21
3.1.1 Výpočet vstupních rastrů.....	21
3.1.2 Tvorba PV modelu	22
3.1.3 Postup jednotlivých aplikací	25
3.2 Vstupní data	27
4 Zhodnocení výsledků.....	28
4.1 Výstupy jednotlivých modelů	28

5 Diskuse a závěr	31
5.1 Diskuse.....	31
5.2 Závěr	33
Seznam zdrojů informací	35
Seznam příloh	40

| PŘEHLED POUŽITÝCH ZKRATEK

CD	kompaktní disk (C ompact D isk)
DMT	D igitální m odel t erénu
DSM	Digitální model povrchu (z ang. D igital s urface m odel)
EVA	Speciální materiál využívaný ve fotovoltaice (e thylene- v inyl a cetate)
GIS	G eografické i nformační s ystémy
ID	identifikační číslo každého prvku
PV	Fotovoltaický (z ang. p hotovoltaic)
Si	chemická značka křemíku (z lat. S ilicium)
URM	Útvar r ozvoje hlavního m ěsta Prahy

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1	Prognóza výroby primárních zdrojů energie mezi lety 2000 a 2050	11
Obr. 2	Roční podíl přímého a odražené záření v České republice	12
Obr. 3	Solární článek z krystalického křemíku	14
Obr. 4	Řez solárním panelem	15
Obr. 5	Znázornění možné integrace PV systémů do budov	16
Obr. 6	Fotovoltaický systém na střeše rodinného domu	17
Obr. 7	Digitální model povrchu centra Lisabonu	18
Obr. 8	Možný potenciál instalace PV panelů ve městě Tuscon (USA)	19
Obr. 9	Závislost výkonu PV panelu na orientaci a sklonu	23
Obr. 10	Ukázka 3D digitálního modelu centra Prahy	27

KAPITOLA 1

Úvod

Fotovoltaika je jedním z druhů obnovitelných zdrojů energie, jehož podstatou je získávání elektrické energie přímo ze slunečního záření. Specifickým způsobem jejího využití je umístění fotovoltaických panelů na střechy budov. I když se v poslední době snížila prodejní cena vyrobené energie skoro o polovinu, fotovoltaika je stále výhodnou investicí, pro jejíž co nejvyšší zhodnocení je důležité správné umístění solárních panelů. Pro posouzení vhodnosti využití střech ale neexistuje mnoho přesných nástrojů, což je spolu se zálibou v geografických informačních systémech, hlavní motivací k sepsání této práce.

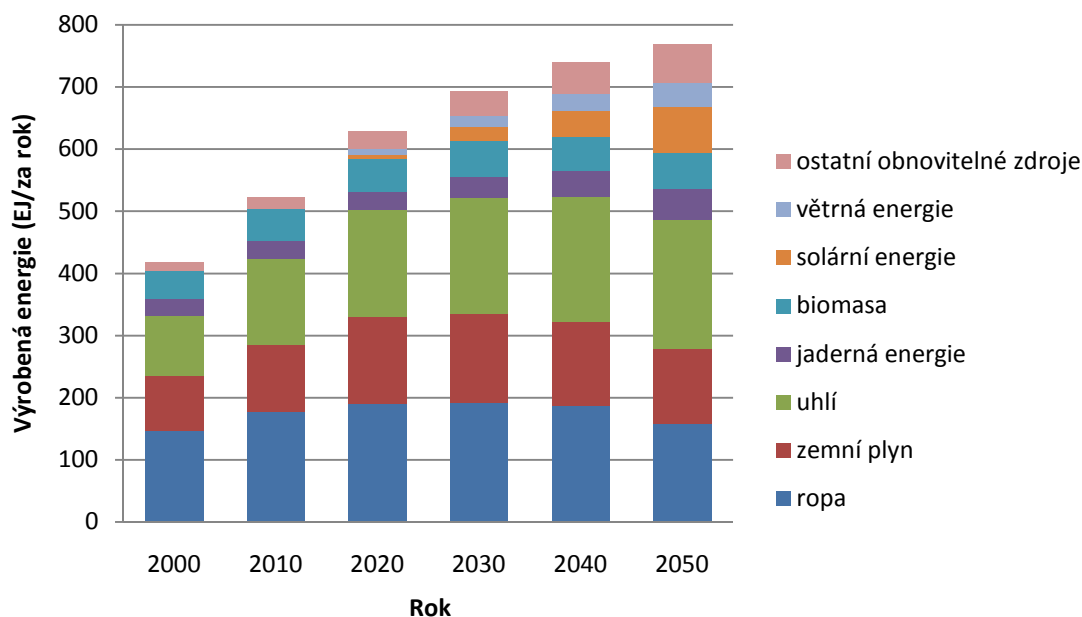
Cílem práce je nejprve stručně popsat úvod do problematiky fotovoltaiky, její následné využití na střechách budov a zhodnocení dostupných metod pro hodnocení jejího potenciálu. Hlavní náplní práce je vytvoření vlastního algoritmu pro posouzení fotovoltaického potenciálu střech pomocí základních nástrojů GIS, který bude následně aplikován na vybrané území Prahy s minimálním počtem 50 budov. Základem práce bude digitální model povrchu získaný od Útvaru hlavního města Prahy (URM). Výstupem práce bude výsledný model uložený do podoby ModelBuilderu, databáze obsahující všechny vypočtené výstupy a nakonec samozřejmě mapy, představující fotovoltaický potenciál zvoleného území.

KAPITOLA 2

Úvod do problematiky

2.1 Energie a člověk

Energie, její výroba a další využití je jedním ze základních faktorů rozvoje lidské civilizace a to zejména v posledních dvou stoletích. V nich se lidstvo převážně soustředilo na využití neobnovitelných zdrojů energie a to fosilních (uhlí, ropa, zemní plyn) a jaderných paliv, jejichž zásoby se postupně vyčerpávají, a při jejichž využívání dochází k nadměrnému poškozování životního prostředí (Beranovský, 2000). Proto s ohledem na budoucnost a její trvale udržitelný rozvoj, tj. „uspokojení současných potřeb bez ohrožení schopnosti uspokojit potřeby budoucích generací,“ (Beranovský, 2000, s. 6) bude muset lidstvo díky zvyšujícím se nárokům na množství energie od neobnovitelných zdrojů upustit a přejít na jiný šetrnější zdroj nebo energeticky méně náročné technologické postupy. Jako řešení se nabízí využití obnovitelných zdrojů energie (Libra; Poulek, 2009). Z obr. 1 vyplývá, že možnou alternativou by se mohla stát sluneční energie. Sluneční záření dopadá na každé místo zemského povrchu a je z hlediska životního prostředí jejím nejčistším a nejšetrnějším zdrojem (Bařinka, 2003).



Obr. 1 Prognóza výroby primárních zdrojů energie mezi lety 2000 a 2050

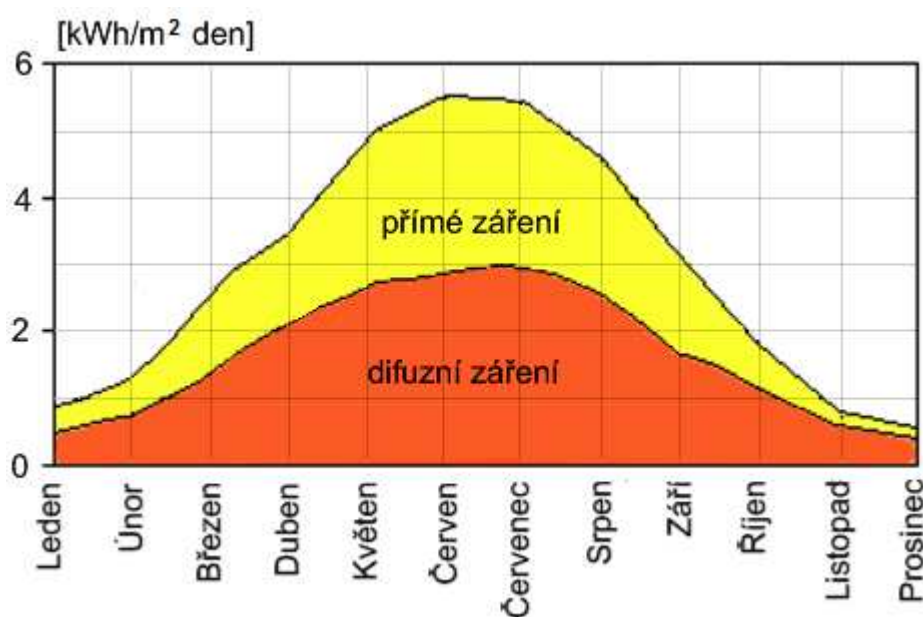
Zdroj: Vytvořeno z dat společnosti Shell (shell.cz)

Jak už bylo řečeno sluneční energie a tedy i fotovoltaické využití střech, které je jedním ze způsobů jejího využití, jsou současným, ale hlavně budoucím řešením výroby energie. Než se však k této stěžejní náplni práce dostaneme, je pro její lepší pochopení nutné stručně popsat základní vlastnosti slunečního záření a jeho následnou přeměnu na elektrickou energii. Právě touto problematikou se zabývá několik následujících kapitol.

2.2 Sluneční záření a přeměna na elektrickou energii

Sluneční záření je podle Netopila ... [et al.] (1984, s. 40) „základním a prakticky jediným zdrojem energie pro planetární geosystém“ a je spjato téměř se všemi zdroji energie (s výjimkou jaderné energie), které člověk v dnešní době využívá a to jak se zdroji neobnovitelnými, tak i obnovitelnými. Zdrojem sluneční energie jsou termonukleární reakce probíhající v jádru Slunce (tzn. jaderná fúze), při kterých dochází, za vysokých teplot (až $1,5 \cdot 10^7$ K), k přeměně vodíku na helium a tím uvolnění velkého množství energie. Z povrchové vrstvy Slunce vychází směrem k zemskému povrchu dva různé typy záření a to elektromagnetické záření, které na Zemi dopadá v podobě světla a tepla a korpuskulární, neboli částicové záření, které si můžeme představit jako proud elektricky nabitých částic hmoty (Čapek, 2001). Do meziplanetárního prostoru se od Slunce dostává elektromagnetické záření odpovídající zhruba energii o velikosti $3,802 \cdot 10^{26}$ W, z níž na zemský povrch, při střední vzdálenosti Země od Slunce, dopadne asi $1,5 \cdot 10^{18}$ kWh/rok (Netopil ... [et al.], 1984). Na intenzitu dopadající slunečního záření mají vliv specifické

podmínky každého místa na Zemi a to hlavně zeměpisná šířka, nadmořská výška, roční období, doba osvit, oblačnost a sklon reliéfu, který je v našem případě nahrazen sklonem solárního panelu vzhledem k dopadajícímu slunečnímu záření. Tyto faktory ovlivňují sklon, dráhu a dobu dopadu slunečních paprsků, či propustnost okolního prostředí a určují tak, o kolik se zmenší intenzita slunečního záření při cestě atmosférou na zemský povrch (Limberk, 2009). V meziplanetárním prostoru se sluneční paprsky pohybují přímočaře a díky velké vzdálenosti Země od Slunce je můžeme považovat za rovnoběžné. Na vnější okraj atmosféry ve střední vzdálenosti Země dopadá záření o průměrné intenzitě 1367 W/m^2 tzv. sluneční konstanta. Pro průchodu elektromagnetického záření atmosférou se snižuje jeho intenzity vlivem rozptylu a pohlcování. Oba tyto procesy jsou přímo závislé na délce dráhy slunečního paprsku v atmosféře, množství příměsí v ní obsažených a hustotě vzduchu, tedy na přírodních podmínkách. (Netopil ... [et al.], 1984). Při průchodu atmosférou se část elektromagnetického záření ztrácí a za ideálních podmínek dopadne na zemský povrch záření o intenzitě asi 1000 W/m^2 , tzv. celkové (globální) záření. Globální záření je tedy celkové množství sluneční energie dopadající na horizontální jednotku plochy za určité časové období a skládá se ze záření přímého a rozptýleného (Thiemešl; Weiß, 2003). Intenzita globálního záření má výrazný denní i roční chod (viz obr. 2), který je závislý na zenitové vzdálenosti Slunce a propustnosti atmosféry. Díky tomu je globální záření na Zemi velmi proměnlivé. Nejvyšší intenzity dosahuje kolem obratníků v oblastech kontinentálních pouští, kde dopadá až 2600 kWh/m^2 . Oproti tomu například v České republice je jeho maximální hodnota 1250 kWh/m^2 (Netopil ... [et al.], 1984).



Obr. 2 Roční podíl přímého a odražené záření v České republice

Zdroj: <http://www.isofenenergy.cz/fotovoltaika.aspx>

2.3 Fotoelektrická přeměna (fotovoltaika)

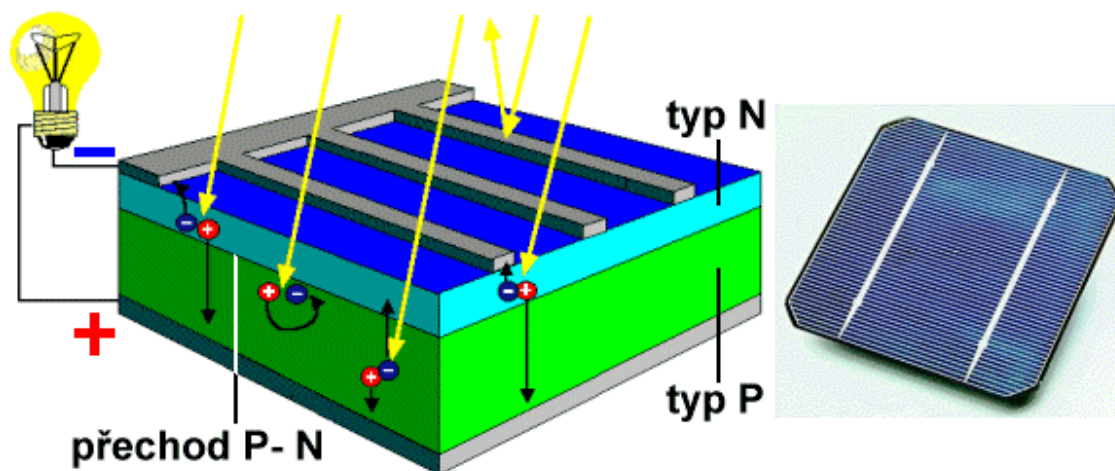
V dnešní době můžeme sluneční záření využít dvojím způsobem, a to k fotoelektrické a fototermální přeměně. Tato práce se zabývá pouze fotoelektrickou přeměnou, dále jen fotovoltaikou, pod kterou si můžeme představit přímou přeměnu slunečního záření na elektrickou energii (Beranovský, 2000; Castro... [et al.], 2005). Fotovoltaika je jedním z nejekologičtějších energetických zdrojů, který bez použití jakýchkoliv pohyblivých částí, jen solárního článku, dokáže vyrobit elektrickou energii, při jejíž výrobě nedochází ke znečištění ekosystému (Gevorkian, 2010). I přes to je podíl elektřiny vyrobené pomocí fotovoltaiky zanedbatelný, a i když v posledních letech došlo a stále dochází k jejímu masivnímu rozvoji nelze očekávat, že by v nejbližších letech její podíl pokryl víc jak jednotky procent celkové spotřeby elektrické energie (Srdečný, 2009). Čistě teoreticky, když pomineme fyzicko-geografické, technologické, ekonomické, politické a jiné nároky, by veškeré energetické potřeby na Zemi mohl pokrýt fotovoltaický panel o ploše 1000 x 1000 km². Pro představu se jedná o plochu, která by zabírala 1/9 největší pouště světa Sahary (Libra; Poulek, 2006).

Jako každý zatím známý energetický zdroj má i fotovoltaika svoje výhody a nevýhody. Hlavní nevýhodou fotovoltaiky je její závislost na denní době, ročním období a oblačnosti. Důležité je také podotknout, že výroba PV článků je velmi energeticky náročná, a proto ekonomická (vysoké pořizovací náklady) a energetická návratnost není okamžitá a trvá delší časový horizont v závislosti na přírodních podmínkách a jeho účinnosti. Největší výhodou fotovoltaiky je její šetrnost k životnímu prostředí. Jedná se o jeden z nejčistších zdrojů elektrické energie. V dnešní době je fotovoltaika považována za jediný obnovitelný zdroj energie, který by jednou mohl pokrýt energetické potřeby lidstva. Fotovoltaika se také pyšní výbornou návratností (poměr vyrobené energie a energie vložené do výroby a chodu solární elektrárny), která je mnohem vyšší než u běžných uhelných, či jaderných elektráren, a která se s technologickým vývojem neustále zvyšuje (Fejfar, 2004).

2.3.1 Princip fotovoltaické přeměny

Základní stavební jednotkou fotovoltaiky je solární (PV) článek (obr. 3). Podle Beranovského (2000, s. 18) je solární článek „polovodičový velkoplošný prvek s alespoň jedním PN přechodem,“ na jehož ploše dochází k absorpci energie fotonů, které dopadají na ozářenou část solárního článku. Vznikají tak elektricky nabitě částice – elektrony a díry, které jsou oddělovány vnitřním elektrickým polem PN přechodu. Tím se mění napětí mezi předním (-) a zadním (+) kontaktem solárního panelu a vzniká stejnosměrný elektrický

proud, jehož velikost přímo závisí na ploše solárního článku a intenzitě dopadajícího slunečního záření. Účinnost přeměny klesá s rostoucí teplotou PV článku. (Bařinka, 2003).



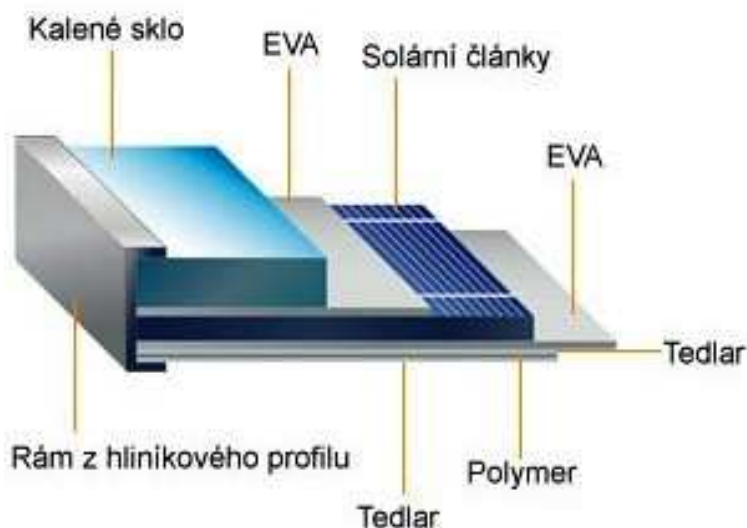
Obr. 3 Solární článek z krystalického křemíku

Zdroj: <http://www.cez.cz/edee/content/microsites/solarni/k32.htm>

V současnosti je celá řada typů a technologií PV článků, které se liší svými vlastnostmi, jimiž máme na mysli složení, účinnost, životnost, návratnost vložených energií při výrobě, či pořizovací náklady. Společným jmenovatelem většiny používaných článků je křemík (Si), který je jejich základním výrobním prvkem a to hlavně díky své nízké ceně, snadné dostupnosti a nejedovatosti. Výroba solárních článků je moderní a perspektivní průmyslové odvětví, které se rychle a dynamicky vyvíjí a neustále zdokonaluje (Libra; Poulek, 2006). Nejvíce využívanou technologií jsou solární články na bázi krystalického křemíku. Procentuálně se jedná až o 85 % všech celosvětově vyrobených článků (Bařinka, 2003). Tenkovrstvé solární články jsou považovány za jakési PV články 2. generace. Jejich základem je tenká vrstva (o tisícíně milimetru) amorfního křemíku nanesená na skleněnou podložku (Fejfar, 2004). Alternativní technologie jsou zatím pouze ve fázi výzkumu. V některých pracích jsou označovány jako technologie třetí generace. Jejich hlavní podstatou a cílem by měla být vysoká účinnost při velmi nízkých pořizovacích nákladech. Z možných technologií se jedná například o vícevrstvé solární články (z tenkých vrstev), články s vícenásobnými pásy, nanotechnologie atd. (Bařinka, 2003).

Paralelním nebo sériovým zapojením a následným zapouzdřením skupiny solárních článků vzniká solární (PV) panel. Základními částmi solárního panelu jsou přední krycí temperované sklo, EVA folie, solární článek a zadní laminátová stěna (viz obr. 4). Solární panely mohou mít různou podobu od fasádních skel a obkladů, až po střešní krytinu. Díky jejich variabilní konstrukci se dají umístit skoro kamkoliv. Nejčastěji jsou instalovány na

střechy a fasády budov, případně na volnou plochu, tzv. „na zelenou louku“, a to na pevné stojany. Další možností je využití pohyblivých stojanů, které slibují větší efektivnost využití dopadajícího záření natáčením PV panelů za Sluncem (Libra; Poulek, 2009).



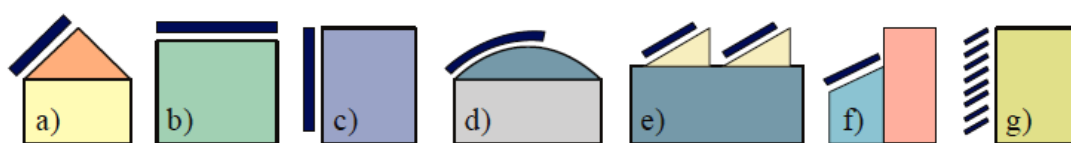
Obr. 4 Řez solárním panelem

Zdroj: <http://www.rdsolar.cz/cenik/solarni-panely/>

Fotovoltaika však nejsou jenom solární články, popřípadě solární panely, ale pro její správné a efektivní fungování jsou zapotřebí další technické prvky. Například napěťový měnič, akumulátorová baterie, regulátor, sledovač Slunce či různé indikační a měřicí zařízení. Ty dohromady tvoří celek, kterému říkáme fotovoltaický systém. Všeobecně se podle způsobu využití dají všechny PV systémy rozdělit do třech základních kategorií a to na ostrovní, síťové a drobné aplikace (Beranovský, 2000).

2.3.2 Fotovoltaické panely na budovách

Využití fotovoltaických panelů v obvodových pláštích budov, ať už se jedná o střechy či fasády, je jedním z moderních trendů současnosti. (Bařinka, 2003). Různé možnosti jejich umístění ukazuje obr. 5. Solární panely už neslouží pouze k výrobě elektrické energie, ale staly se plnohodnotnými stavebními prvky. Jedná se o další možnost využití fotovoltaiky, která ještě více zvyšuje její atraktivitu a výrazně snižuje náklady při instalaci PV systémů. Pro integraci fotovoltaiky do budov se u odborné veřejnosti vžilo anglické označení „Building Integrated Photovoltaics“ neboli BIPV (Žeňka; Tywoniak; Staněk, 2007).



(a) šikmá střecha, (b) plochá střecha, (c) fasáda, (d) tenkovrstvá FV pro velké střešní plochy, (e) průmyslové aplikace, (f) semitransparentní FV pro atria a výplně otvorů, (g) vnější stínící a clonící systémy

Obr. 5 Znáznornění možné integrace PV systémů do budov

Zdroj: Žeňka (2007) – upraveno

Při umístění solárního systému je také důležité, v jaké části města se budova nachází. S tímto faktorem většinou přímo souvisí i její druh, funkce a staří. Například mnohem obtížnější, v mnoha případech nemožné, je umístit PV panely v historickém centru města, které je chráněno různými památkovými omezeními, oproti budovám v průmyslové části města, či rezidenční zástavbě (Hofierka; Kaňuk, 2009). Mezi výhody PV elektrárny instalované na některé části budovy, oproti umístění na volné ploše, patří: nezabírá zemědělskou půdu, elektrárna je méně přístupná zlodějům a vandalům, což snižuje náklady na zabezpečení. V budově jsou zřízeny elektrické přípojky a díky nižšímu výkonu elektrárny ji lze snáze připojit do veřejné rozvodné sítě. Snižují se také ztráty v síti způsobené přenosem elektrické energie na velké vzdálenosti. Naopak mezi nevýhody PV elektrárny na budovách patří: plocha pro výstavbu je omezená velikostí budovy a její maximální výkon a energetická návratnost přímo závisí na jejím sklonu, orientaci a zastínění okolními budovami, či vegetací. V některých případech nelze solární panely vhodně začlenit do vzhledu budovy, hlavně kvůli omezené velikosti a tvaru solárního panelu, a tak může dojít ke zhoršení jejího vzhledu (Srdečný, 2009). Fotovoltaické využití střech v sobě skrývá obrovský a ve velké míře nevyužitý, energetický potenciál v podobě množství volných, vhodně orientovaných ploch. Využití těchto ploch v městských oblastech by mohlo v mnoha zemích pokrýt roční spotřebu elektrické energie (Šuri [et ... al.], 2007a). Například podle studie Osnabrücké univerzity by vhodně umístěné solární panely na střechách budov pokryly až 70 % elektrické spotřeby tohoto města (Esri, 2010b). Tento potenciál, díky podobné geografické poloze, má využití střech v České republice, tedy i v Praze. Nalezení vhodných ploch pro jejich PV využití závisí na několika důležitých parametrech, mezi něž patří počet a výška budov, hustota obyvatel, typologie městského zástavby, sklon, orientace, umístění PV panelu, ostínění, památková opatření a výhodnost PV systémů oproti jinému způsobu využití střech (Izquierdo; Rodrigues; Fueyo, 2008). Nejvýhodnějším řešením, z hlediska využití maximálního slunečního potenciálu střech, by bylo umístit PV panel na pohyblivou konstrukci (tzv. tracker), která se

v průběhu dne natáčí tak, aby sluneční paprsky dopadaly po celý den kolmo na solární panel. Toto řešení lze aplikovat pouze na budovy s plochou střechou, tedy sklonem 0° (Srdečný, 2009).

Pro území České republiky, rozdíly na jejím území jsou minimální, je matematicky a empiricky ověřen nejvhodnější sklon střechy, který je 35° s jižní orientací panelu, přičemž je lepší odchylka na západ než na východ, protože v ranních hodinách se vyskytuje průměrně více oblačnosti než po poledni (Srdečný, 2009). Na obr. 6 si můžeme prohlédnout PV panely umístěné na střeše rodinného domu.



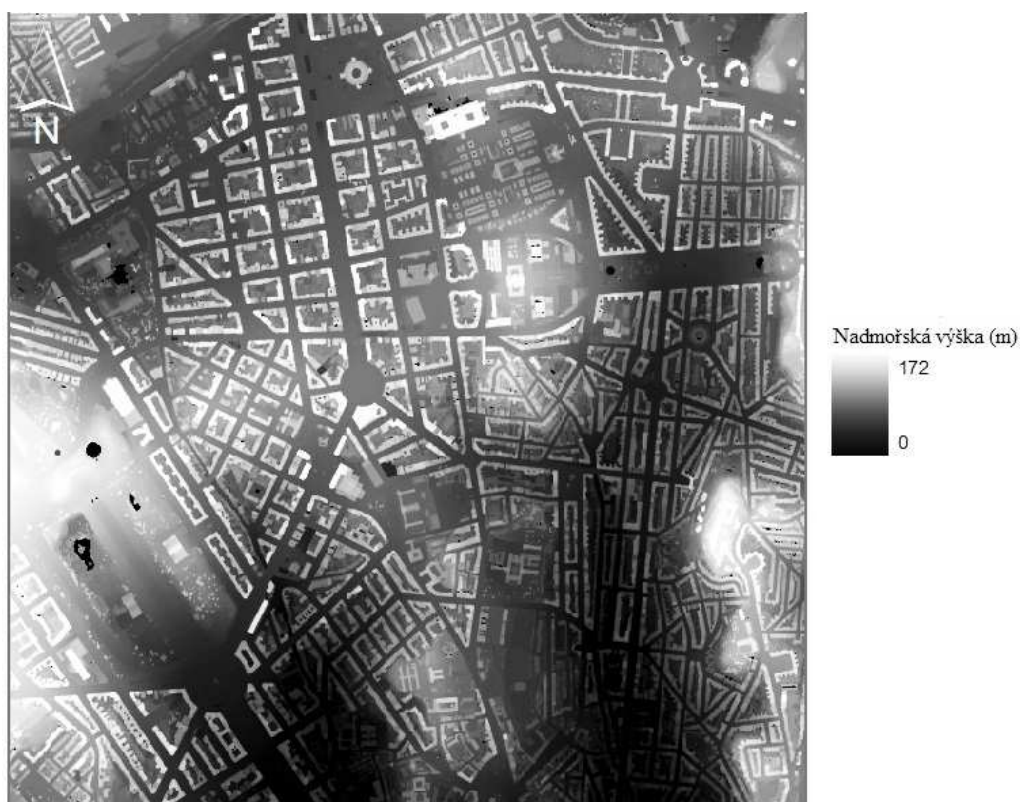
Obr. 6 Fotovoltaický systém na střeše rodinného domu

Zdroj: <http://ekonomika.idnes.cz>

Ne všechny střechy jsou však zcela vhodné, a proto je důležité najít rychlé a levné metody pro určení jejich PV potenciálu. Možným řešením je využití geografických informačních systému tzv. GIS (Chaves; Bahill, 2010). Podle Šúriho ... [et al.], (2007b) jsou GIS účinným nástrojem k posouzení využití solárních zdrojů na nadnárodní, národní i regionální úrovni, který dokáže komplexně zpracovávat prostorové informace. I přes velký pokrok ve využití sluneční energie, neexistuje jednoznačná metoda pro posouzení fotovoltaického potenciálu (Dunlop, 2009), jehož výsledkem by měl být přesný, spolehlivý, levný, efektivní a flexibilní nástroj, který bude navíc nenáročný na vstupní data a variabilní pro jakékoliv měřítkové použití (Izquierdo; Rodrigues; Fueyo, 2008). Rozličné metody hodnocení PV potenciálu střech budov už byly v minulosti aplikovány na vybrané části měst Evropy a USA, ale žádná ze studií se zatím nezabývá jejich využití na území České republiky.

2.3.3 Modelování PV potenciálu v GIS

Většina GIS metod publikovaných v pracích autorů po celém světě postupuje při výpočtu fotovoltaické potenciálu velice podobně. Postupy se liší pouze použitím rozličných nástrojů a technik. Proto můžeme modelování PV potenciálu všeobecně shrnout do třech kroků a to na určení: a) fyzikálního potenciálu, čím myslíme celkové množství sluneční energie dopadající na zkoumané území, b) geografického potenciál, který určuje překážky při dopadu slunečního záření a c) technického potenciál území, který zastupuje vlastnosti solárního článku, tedy jeho účinnost a množství vyrobené elektrické energie. Pro úplné dokreslení výhodnosti umístění PV systému na střechy budov je vhodné zahrnout i analýzu ekonomického a sociálního potenciálu zájmového území (Izquierdo; Rodrigues; Fueyo, 2008).



Obr. 7 Digitální model povrchu centra Lisabonu

Zdroj: Santos s kol. (2011) – upraveno

Základem všech metod pro využití PV potenciálu střech budov je digitální model povrchu (DSM), ze kterého lze použitím vhodných nástrojů GIS získat všechna potřebná data (sklon a orientaci střech, ostínění atd.). DSM (viz obr. 7) je většinou vytvořený spojením rastrové podoby 3D modelu budov, vytvořeného laserovým skenováním, či fotogrammetrickým měřením a digitálního modelu terénu (Hofierka; Kaňuk, 2009, Esri,

2010b, Chaves; Bahill, 2010, Santos ... [et al.], 2011). Jako vhodné nástroje lze použít základní funkce zvoleného GIS programu, například v ArcGIS převážně sada nástrojů Spatial Analyst, jejichž poskládáním v nástroji ModelBuilder lze dosáhnout vytvoření jednoduchého komplexního nástroje (Esri, 2010b, Chaves; Bahill, 2010). Tato metoda je hlavní náplní této práce. Druhou metodou je naprogramování vlastního algoritmu pro daný výpočet, která je využívána především pro stanovení dopadajícího slunečního záření a pro zjištění dalších parametrů jsou opět použity nástroje GIS (Izquierdo; Rodrigues; Fueyo, 2008, Choi ... [et al.], 2011). Výstupem modelů jsou mapy, které vyjadřují, jak číselně, tak graficky, potenciál výroby elektrické energie, možný počet solárních panelů (obr. 8), či jen místa, která jsou pro jejich umístění nejvhodnější. Tyto mapy jsou často umísťovány na internet ve formě jednoduchých webových aplikací.



Obr. 8 Možný potenciál instalace PV panelů ve městě Tuscon (USA)

Zdroj: Chaves, Bahill (2010) – upraveno

Pro hodnocení PV potenciálu střech je mimo sklonu a orientace střech, které lze při znalosti digitálního modelu povrchu (DSM) lehce určit pomocí nástrojů jakéhokoliv GIS, důležitá celková hodnota dopadajícího slunečního záření, která v globálním měřítku klesá se zeměpisnou šířkou, což je způsobeno tvarem Země a její rotací a otáčením kolem Slunce. Na regionální úrovni, kam řadíme i plochy střech, je hlavním určujícím faktorem terénu (reliéfu). Mapy a digitální databáze s prostorovými daty představující množství

dopadajícího záření jsou důležité nejen pro fotovoltaiku, ale jsou využitelné i v jiných technických a vědeckých odvětvích (Hofierka; Šúri, 2002). Například v ekologii při vytváření map míst s nejvyšším úhrnem slunečního záření a nejvyšší teplotou, které poté slouží k předpovědi výskytu invazních druhů rostlin v Yellowstoneském národním parku (Huang ... [et al.], 2009). Pro určení globálního záření na určitou plochu lze použít několik metod. První metoda vychází z pozemního měření na meteorologických stanicích. Naměřená data jsou poté interpolována pomocí různých interpolačních funkcí (Hutchinson ... [et al.], 1984). Druhou možností je použití meteorologických geostacionárních satelitů, které jsou sice méně přesné než pozemní měření, ale za to jsou schopné za krátkou dobu pokrýt rozsáhlé území (Noia ... [et al.], 1993). Obě tyto metody, ale nejsou zcela vhodné pro malé a členité městské lokality. Poslední možností je vytvoření modelu slunečního záření s využitím GIS. Jedním z prvních GIS modelů byl SolarFlux (Dubayah; Rich, 1995). Od té doby byla vyvinuta celá řada modelů, z nichž zde uvedeme dva a to komerční Solar Analyst vyvinutý jako extenze pro ArcGIS (Santos ... [et al.], 2011, ArcGIS help library, 2012) a model r.sun vyvinutý Šúrim a Hofierkou (2004) pro open source GRASS GIS. Model r.sun byl například využit při tvorbě fotovoltaické geoinformačního systému tzv. PVGIS (Hofierka; Šúri, 2002). Všechny modely při svých výpočtech vychází z těchto základních parametrů a to: zeměpisné šířky, deklinace a hodinového úhlu Slunce, nadmořské výšky, sklonu a orientace povrchu a v neposlední řadě propustností atmosféry a oblačnosti (Šúri, 2002).

Pro odhad PV potenciálu střech budov lze dnes využít několik webových aplikací založených na využití GIS. Jejich přehled můžeme nalézt například v práci Choi ... [et al.] (2011). Tyto webové nástroje jsou dobrým pomocníkem, který skrze interaktivní mapy a animace dokáže namodelovat výkon PV systémů. Jejich nevýhodou je nižší přesnost způsobená zjednodušováním při výpočtu a předdefinovanými vstupními hodnotami, které sice usnadňují použitelnost těchto nástrojů pro širokou veřejnost, ale v městském prostředí, které je velmi proměnlivé, mohou způsobit nepřesnosti (Hofierka; Kaňuk, 2009). Tyto nástroje jsou na internetu volně k použití a lze je aplikovat, jak na velké územní celky, například PVGIS, který lze použít pro celou Evropu a Afriku (Šúri ... [et al.], 2005), tak na maloplošné areály jednotlivých měst. Do této skupiny webových aplikací, mimo jiné, patří LA County Solar map, která je využitelná pro území Los Angeles (Shields, 2011), SUN-AREA research project v německém městě Osnabrück (Esri, 2010b), či projekt Solar Boston, na jehož vývoj bylo pro zajímavost vynaloženo 550 000 \$ (Esri, 2010a).

KAPITOLA 3

Metodika a data

3.1 Metodika

Metodický postup práce je založený na využití digitálního modelu povrchu („digital surface model“ – DSM), na který byly postupně aplikovány nástroje programu ArcGIS, hlavně ze skupiny Spatial analyst. Výsledný fotovoltaický potenciál vznikl kombinací vhodných rastrů sklonu a orientace střech s množstvím dopadajícího slunečního záření. Výstupem PV modelu jsou polygony představující místa s nejvhodnějším umístěním fotovoltaických panelů. Výsledný postup, tedy sled použitých nástrojů, byl vložen do nástroje ModelBuilder, který umožňuje jeho rychlou aplikaci na jakémkoliv území. Pro lepší interpretaci bylo z polygonů vytvořeno několik názorných mapy.

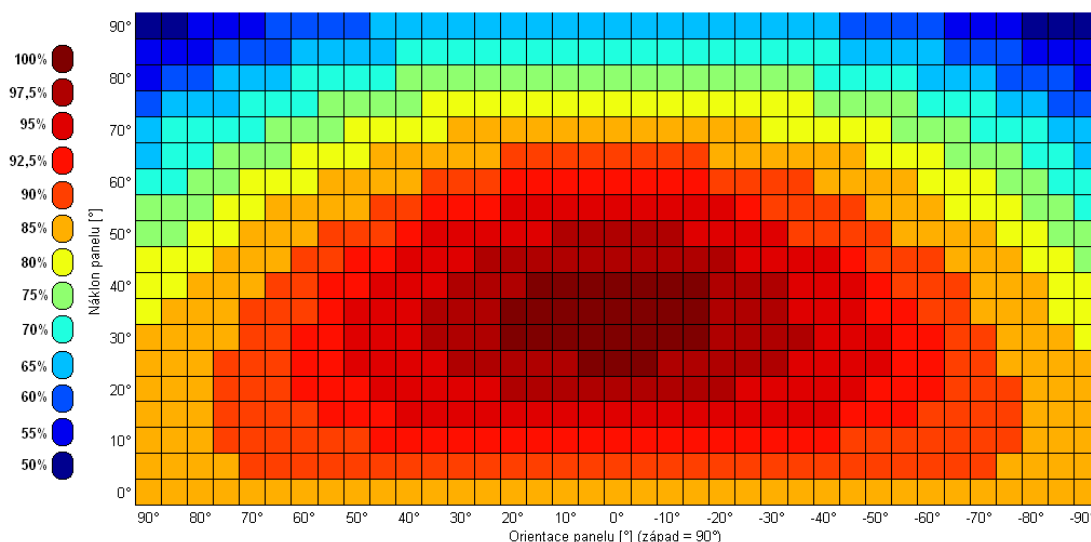
3.1.1 Výpočet vstupních rastrů

Prvním krokem práce bylo vytvoření rastrů sklonu, orientace a množství dopadajícího slunečního záření, jejichž základem se stal DSM. Sклон digitálního modelu povrchu byl určen pomocí nástroje Slope. Slope pracuje s rastrovým formátem dat, pro jehož každý pixel je spočten nejvyšší výškový rozdíl od sousedních osmi buněk. Rastr orientace střech byl vypočten nástrojem Aspect. Aspect udává směr sklonu každé buňky k jejím okolním sousedům. Orientace je měřena od severu (0°) po směr hodinových ručiček. Ploché střechy, které logicky nemají žádnou orientaci, jsou reprezentovány hodnotou -1 (Burrough; McDonell, 1998, ArcGIS help library, 2012). Poslední rastr, znázorňující množství dopadajícího slunečního záření a s tím spojeného ostínění povrchu, byl vytvořen nástrojem Area solar radiation. Metodika jeho výpočtu vychází z kombinace 3 rastrů. Prvním je viewshed, který určuje plochu oblohy viditelnou z každého zkoumaného území. Informace o viditelnosti a zakrytí oblohy jsou ukládány do podoby binárního rastru.

Druhým rastrem je mapa představující pohyb Slunce po obloze, z jejíchž buněk lze vyčíst jeho polohu v průběhu roku. Kombinací s rastrem viewshed vzniká rastr přímého slunečního záření. Posledním rastrem je mapa oblohy, která znázorňuje směr dopadu slunečních paprsků na základě znalosti zenitového úhlu a azimutu Slunce. Jeho spojení s viewshed je vytvořen rastr rozptýleného slunečního záření. Rastr celkové intenzity slunečního záření (tzv. globální záření) je vytvořen sečtením rastrů záření přímého s rozptýleným. Tento postup je aplikován na každý pixel vstupního rastru. Model zanedbává sluneční záření odražené od zemského povrchu. Matematický výpočet jednotlivých rastrů vychází z algoritmů publikovaných v práci Rich ... [et a.] (1994), které byly dále propracovány v pracích Fu a Rich (2000, 2002), či je můžeme nalézt v helpu programu ArcGIS (ArcGIS help library, 2012). Při tvorbě stačilo, mimo DSM, zadat pouze časový interval dopadajícího záření.

3.1.2 Tvorba PV modelu

Po vytvoření tří základních rastrů bylo nutné vybrat jen ty plochy (pixely, neboli buňky), které splňují stanovené parametry. Před samotným postupem bude ozřejměna metodika jejich výběru. Pro přírodní podmínky České republiky jsou nejideálnější střechy s jižní orientací a sklonem panelu 35° (Srdečný, 2009). Hodnota sklonu se v různých materiálech nepatrně liší. Ideální parametry byly v práci rozšířeny o JV až JZ orientaci ($160 - 200^\circ$) a sklon $30 - 40^\circ$. Ty sice nemají takový výkon jako ideální instalace, ale jejich rozdíl je velice malý (v řádu jednotek %), takže ho můžeme zanedbat. Z obr. 9, lze jednoduše vyčíst, o kolik procent se liší výkon PV panelu v závislosti na sklonu a orientaci střechy. Například instalace panelů na střechy se západní, či východní orientací a sklonem 35° snižuje výkon až o 20 %.



Obr. 9 Závislost výkonu PV panelu na orientaci a sklonu

Zdroj: <http://www.silektro.cz/solarni-elektřarny/sklon-a-orientace-34>

Druhým ideálním řešením pro instalaci jsou ploché střechy, na které lze umístit PV panely na konstrukce s libovolným sklonem a orientací. S rozvojem nových technologií můžeme takto využít střechy až se sklonem 9,5° (Vykydal, 2010). Další možností využití plochých střech je umístění panelů vodorovně (sklon 0°), čímž se ale snižuje jejich výkon zhruba o 10 %. Pro výpočet výkonu v další části práce bylo kvůli jednoduchosti použito právě toto řešení. Posledním parametrem, který je zapotřebí definovat je zastínění střech okolními budovami, komíny, terénem, vegetací a atd. Zastínění bylo stanoveno nepřímou, skrze výpočet intenzity slunečního záření. Byl stanoven předpoklad, že plochy s dostatečnou intenzitou slunečního záření nejsou v průběhu roku zastíněny vůbec nebo jen minimálně. Na území České republiky dopadá na horizontální plochu globální záření o intenzitě asi 900 – 1200 kWh/m² za rok. Praha spadá do intervalu o střední hodnotě 1100 kWh/m², která může ročně oscilovat o +/- 10 % (Srdečný; Beranovský, 2010). Při přepočtu na plochu orientovanou k jihu se sklonem 35° je průměrná roční hodnota asi 1250 kWh/m² (Cihelka, 2004). Po podrobné analýze byla jako hranice zastínění stanovena právě minimální intenzita slunečního záření dopadající na území. Vhodné plochy střech se tedy nacházejí na průniku rastrů buněk s hodnotami 0° a 30 – 40°, orientací -1 a 160 – 200° a intenzitou slunečního záření větší než 900 kWh/m².

Pro tvorbu PV modelu bylo opět využito nástrojů ze skupiny Spatial Analyst, konkrétně Math a Map algebra. Důležitou podmínkou k využití vhodných nástrojů a tedy k úspěšnému řešení této problematiky, byla stejná velikost a počet buněk používaných rastrů. Požadovaný sklon byl vypočten kombinací rastru představující ideální sklon šikmých ploch s rastrem plochých povrchů. Pro skloněné plochy byl nejprve vypočten

binární rastr představující všechny pixely s hodnotou větší nebo rovnou 30° nástrojem Greater than equal a poté nástrojem Less than equal buňky s hodnotou menšími nebo rovnou 40° . Vzniklé binární rastry byly vloženy do nástroje Combinatorial and, který vypočetl jejich průnik. Ten spojil oba rastry na základě pravidla, které buňkám vyskytujícím se na stejném místě v obou rastrech a nabývajícím přitom hodnoty jedna tuto hodnotu ponechal a ostatním přidělil nulu. Vzniklý rastr byl spolu s výstupem z nástroje Equal to, kterým byly spočteny pixely se sklonem 0° , vložen do nástroje Combinatorial or, který rastr klasifikoval do 3 tříd a to na buňky, které v obou případech nabývali hodnoty 0, v prvním rastru 0 a druhém 1 a naopak. Tím vznikl rastr spojující oba typy povrchů, který byl pro další využití reklasifikován nástrojem Reclassify do podoby rastru, ve kterém hodnoty 1 a 2 představovaly ideální plochy k instalaci a hodnota 6 ty nevhodné. Analogicky bylo postupováno při tvorbě vhodně orientovaných ploch jen za použití jiných hodnot vymezujících jejich orientace ke světové straně. Nakonec byl vytvořen rastr představující plochy s minimální možnou intenzitou dopadajícího záření pomocí nástroje Greater than, který byl poté reklasifikován, tak, že byla ponechána hodnota 1 a 0 byla opět nahrazena 6. Nula byla ve výpočtech nahrazována šestkou z důvodu odlišení ideálně skloněných od plochých střech, které bylo dále využito při výpočtu výkonu. Průběžným výsledkem tedy byly 3 rastry, které byly následně sečteny v nástroji Raster calculator a vytvořený výstup byl reklasifikován. Tím z něho byly odstraněny všechny hodnoty, až na hodnotu 3, která představuje šikmé a hodnotu 5, které odpovídají plochým střechy. Vhodné plochy, které splňovaly stanovené parametry, ale nenacházely se v půdoryse budov zástavby 3D modelu Prahy, byly odmaskovány nástrojem Extract by mask. Vzniklé plochy byly poté převedeny na polygony nástrojem Raster to polygon. Nakonec byla provedena vizuální kontrolu výstupu, kterou byly odstraněny polygon, jež se nepovedlo odmaskovat. Konečný výstup představuje nejvhodnější plochy střech budov pro fotovoltaické využití zvoleného území. Pro jednoduchou aplikaci byl postup vložen do nástroje ModelBuilder, který umožňuje výpočet PV potenciálu jen při zadání digitálního model povrchu a vrstvy zástavby. Náhled PV modelu ukazuje Příloha 1.

Vytvořený model je složený z mnoha nástrojů a pracuje s velkým množstvím dat, takže jeho výpočet může v závislosti na stáří hardwaru počítač a velikost zkoumaného území trvat i desítky minut. PV model je vhodné spouštět přes funkci Edit a před jeho spuštění musí být nastaveny cesty ukládání jednotlivých vrstev.

3.1.3 Postup jednotlivých aplikací

Už vytvořené polygony vhodnosti umístění jsou sami o sobě jedním z možných výstupu hodnocení PV potenciálu Prahy. Prvním způsobem využití vytvořených dat byl orientační výpočet potencionálního výkonu panelů instalovaných na vhodných plochách střech. Před samotnou analýzou bylo stanoveno, že všechny panely umístěné na střechách budov jsou z krystalického křemíku o účinnosti 17%, velikosti 1,8 m² a výkonu 250 Wp. Výkon PV panelu byl vyjádřen jako součin množství dopadajícího slunečního záření za rok s jeho plochou a účinností, které se skládala z účinnosti panelu, střídače a transformátoru. Účinnost celého PV systému byla pro tuto práci stanovena na 13 % (Czech RE agency, 2012). Výpočet dále nezahrnuje snížení výkonu ztrátami vytvořenými ostatními částmi PV systému, přítomností střešních oken, teplotou a stářím panelu, takže vypočtený výkon bude v praxi ještě o pár procent nižší. Na plochých střechách musí být jednotlivé řady PV panelu umístěny, tak aby se vzájemně nezastiňovaly. To má za následek snížení rozlohy instalační plochy. Pro 1 kW výkonu na skloněné střeše je potřeba asi 7 – 9 m², za to na ploché 17 – 20 m² (Enertec solution, 2012). Proto byl výpočet jejich výkonu, vzhledem k rozdílné geometrii a tím spojené složitosti posouzení vhodného umístění, zjednodušen a nahrazen vodorovnou instalací PV panelů (sklon 0°).

Vzorec výpočtu vypadá jednoduše, ale jeho realizování bylo ztíženo vložením informace o dopadajícím slunečním záření k jednotlivým plochám atributové tabulky stanovených ploch. K tomu byl využit rastr intenzity slunečního záření (nástroj Area solar radiation) a vrstva vytvořená PV modelem, z které byly nejprve do nových shapefilů vyexportovány samostatně ploché a vhodně skloněné střechy a to z důvodu odlišného výpočtu jejich výkonu. Pro každou vzniklou vrstvu byl proveden tento postup: před jejím vložením do nástroje Zonal statistics bylo nutné převést velikost polygonů na celá čísla, protože s jinak vymezenými zónami nástroj neumí pracovat. Proto byl v atributové tabulce polygonů vytvořen nový sloupec nástrojem Add field s hodnotou Integer (celé číslo) a do něj spočítána nástrojem Calculate field velikost jednotlivých polygonů v celých číslech. Zonal statistics ořízl rastr podle polygonů a každému pixelu přiřadil, na základě zvoleného parametru Sum, hodnotu součtu všech buněk, které polygon překrýval. Předpokladem toho postupu je velikost hrany pixelu 1 m, tedy jedna buňka tvoří plochu, na kterou je definováno dopadající sluneční záření (Wh/m²). Dalším krokem bylo převedení vzniklých rastrových ploch na polygony pomocí nástroje Raster to polygon, který umí pracovat jen s rastry s hodnotami celého čísla, a proto musely být jednotlivé buňky rastru množství dopadajícího slunečního záření zaokrouhleny nástrojem Int. To, ale přineslo problém, protože celkové dopadající roční záření bylo velmi vysoké (Wh/m²) a Int s ním nedokázal

pracovat. Proto muselo být nejprve převedeno na kWh/m² pomocí nástroje Raster calculator. Až poté mohly být hodnoty buněk pomocí nástroje Int zaokrouhleny a následně převedeny na polygony. V jejich atributové tabulce byl vytvořen sloupec pro výkon, do něž byl vložen součin množství dopadajícího slunečního záření se stanovenou účinností PV systému. U plochých střech byl navíc výkon snížen o 10 % kvůli horším instalačním podmínkám. Poté byly obě vzniklé vrstvy spojeny nástrojem Merge a z jeho výstupu odstraněny polygony s nedostatečnou plochou pro instalaci PV panelů, tedy menší než 1,8 m². K tomu byl využit nástroj Select by attributes, kterým byly polygony vyhledány a poté v režimu editace smazány z atributové tabulky. Výsledkem modelu jsou tedy polygony představující možný výkon ploch střech. Model lze teoreticky použít na jakémkoliv území, ale pokud nemá správný úhel a orientaci nemusí být i přes vysoký výkon daná plocha zcela ideální pro instalaci a to kvůli jeho možnému velkému rozkolísání v průběhu roku. Proto je vhodné při výpočtu využít i PV model, který toto riziko minimalizuje. Metodický postup byl opět vložen do ModelBuilderu (Příloha 2), až na prvotní export vrstev a konečné odstranění drobných polygonů, pro něž nebyl nalezen vhodný nástroj pro použití v jeho prostředí.

Posledním výstupem práce je určení přibližné návratnosti investice do instalace fotovoltaických panelů na vymezené plochy nástrojem PV model, při použití stejného typu panelu jako v předchozí části práci. V analýze je zanedbána ztráta výkonu panelu způsobená postupným stářím, která je u panelu z krystalického křemíku asi 0,5 % za rok. Průměrně cena panelů o výkonu 1 kWp je 55 000 Kč a klesá v závislosti na velikosti instalace. Jeden PV panel zabírá plochu 8 m², takže cena 1m² PV panelu je asi 6 875 Kč, z níž 2/3 připadá na samotný solární panel a zbytek na instalační náklady (nazeleno.cz, 2012). Výkupní cena energie je pro PV elektrárny uvedené do provozu v roce 2012 s výkonem do 30 kW je 6,06 Kč/kWh při prodeji veškeré vyrobené energie a 5,08 Kč/kWh při tzv. zelených bonusech, tedy za předpokladu, že je část energie využita pro vlastní potřebu a zbytek prodáván do rozvodné sítě (Energetický regulační úřad, 2011). Pro výpočet návratnosti byla použita cena pro prodej veškeré energie. Nejprve bylo nutné spočítat celkovou cenu instalace jako součin vhodných ploch střech s cenou PV panelu za 1 m². Poté byl určen součinem vyrobeného výkonu s cenou za 1 kWh roční zisk. Návratnost byla spočtena podílem pořizovacích nákladů a ročního zisku PV elektrárny. Postup byl opět automatizován vložením do ModelBuilderu (Příloha 3).

3.2 Vstupní data

Pro využití PV potenciálu střech měl být podle zadání použit 3D digitální model Prahy vytvořený Úvarem rozvoj hlavního města Prahy (URM). Tento model vznikl na základě vyhodnocení dvojice svislých leteckých snímků fotogrammetrickou metodou, pokrývá celé území města a mimo městské zástavby obsahuje i terén, mosty a zeleň (viz obr. 10). Budovy jsou v atributové tabulce modelu rozděleny na části do 8 kategorií (například svislá stěna, komín, vikýř atd.) a je jim přidělen kód prvku budovy a její jedinečné ID označení (URM, 2012a).



Obr. 10 Ukázka 3D digitálního modelu centra Prahy

Zdroj: <http://www.geoportalpraha.cz/cs/clanek/6/3d-model-digitalni-model-zastavby-a-zelene>

Po získání 3D modelu, jeho bližším prozkoumáním a následné konzultaci s vedoucím práce a jinými GIS specialisty (například ze společnosti ArcData) bylo zjištěno, že data v sobě nemají obsaženou výšku, která je potřebná pro práci nástrojů Spatial Analyst, a proto byl shledán jako pro tuto práci nevhodný. Výška by z 3D modelu šla získat jen s využitím složitých programovacích postupů. 3D model byl nakonec v práci použit jen pro odmaskování ploch, které splňovaly požadované parametry, ale nevyskytovaly se na střechách budov.

Základním zdrojem dat se proto stal digitální model povrchu (DSM), který byl vytvořen a získán opět z URM. DSM vznikl sloučením digitálního modelu terénu a digitálního modelu zástavby, který byl vygenerován z 3D modelu hlavního města, a který neobsahuje na rozdíl od 3D modelu vegetaci a je tedy tvořen pouze terénem s budovami. Jedná se o rastrový model, který je složen z 910 milionů pixelů o velikosti hrany 1 m a každý z pixelů udává nadmořskou výšku (URM, 2011b).

KAPITOLA 4

Zhodnocení výsledků

Hlavním výsledkem práce jsou tři na sebe navazující modely, jejichž úkolem je vyhledat nejvhodnější plochy pro instalaci fotovoltaických panelů na střechách budov a určit jejich potenciální výkon a návratnost. Pro aplikaci modelů a následné vizuální posouzení přesnosti, byla zvolena čtvrt Karlín, která leží v městské části Praha 8. Na území Karlína se z části nachází památková zóna, která by ale neměla být překážkou případné instalace (URM, 2012c). Všechny tři modely byly vloženy do společného toolboxu a uloženy na přiloženém CD.

4.1 Výstupy jednotlivých modelů

Prvním vytvořeným model je model pro výpočet nejvhodnějších ploch střech pro umístění fotovoltaických panelů. Jeho výstupem je databáze obsahující části střech všech budov Karlína, na které se na základě zvolených kritérií dají umístit fotovoltaické panely. V atributové tabulce výsledného shapefilu se nachází kromě velikosti a specifického ID každého polygonu sloupec obsahující atributy, které od sebe odlišují ploché a vhodně skloněné střechy. Při pohledu na jednotlivé polygony je jasné, že nezabírají celé plochy střech, ale pokrývají jen jejich určité části. To je způsobeno rozdílným množstvím dopadajícího záření, na němž má největší podíl zastínění okolními budovami a prvky vyskytujícími se přímo na posuzované střeše, jako jsou například komíny, věže, atd. Další vliv má reliéf v okolí zástavby. Na území Karlína můžeme tento jev pozorovat na celkově nižší roční intenzitě dopadajícího slunečního záření na jižní straně čtvrti pod vrchem Vítkov, než na opačné straně na nábřeží Vltavy. Zastínění je zde nejvíce patrné v zimních měsících. Určitě bychom neměli zapomenout zmínit, že přesnost výsledku v první řadě závisí na kvalitě digitálního modelu povrchu, jehož rozlišení je v našem případě 1m.

Pro zhodnocení přesnosti správného určení vhodných ploch bylo použito vizuální posouzení shodnosti výsledných polygonů s rastry sklonu a orientace, které byly jedním z mezivýpočtů modelu a čtyřmi rastry osvětlení povrchu vytvořenými dodatečně nástrojem Hillshade. Osvícení bylo namodelováno pro poledne obou rovnodenností a slunovratů, čímž byla jednoduše nastíněna jeho změna v průběhu roku. Po vizuálním prozkoumání celého území bylo zjištěno, že až na rastr představující osvit území v zimní části roku se vytvořené plochy skoro bezchybně shodují s rastry sklonu, orientace i zbylých rastrů osvětlení. Jediný výrazný překryv polygonů s buňkami představující stín je tedy s rastrem osvitu pro zimní slunovrat (21.12.). Vhodné plochy nacházející se v zimě na zastíněných částech střech jsou nejvíce patrné na zástavbě v těsné blízkosti vrchu Vítkov, ale v menším měřítku je můžeme najít i v centru čtvrti, viz Příloha 4. Odstranění těchto ploch by šlo provést skrze stanovení vyššího parametru při tvorbě rastru minimální požadované intenzity slunečního záření. Na druhou stranu při prozkoumání výstupu potenciálního výkonu, jehož mezivýpočtem je i intenzita dopadajícího slunečního záření zjistíme, že na všechny tyto plochy dopadá stejná průměrná roční intenzita, jako na plochy, které v tuto dobu zastíněny nejsou, a proto bychom při změně této hranice přišli i o ně. Tento fakt můžeme vysvětlit tím, že v zimě celkově dopadá na území České republiky velmi málo slunečního záření a tak tyto ztráty nemají na jeho celkovém množství takový vliv. Navíc zastínění v této lokalitě netrvá celý den, ale střechy jsou ve stínu hlavně v dopoledních hodinách, kdy je v průměru nižší intenzita dopadajícího záření, než odpoledne. Proto je předpokládáno, že tyto plochy, i přes částečné zastínění v zimě, jsou vhodné pro instalaci fotovoltaických panelů. Velmi přesné překrytí vektorové vrstvy vhodných ploch střech s rastry sklonu a orientace představuje Příloha 5.

Konečným výsledkem aplikace modelu je mapa Karlína (okolí Křižíkovy ulice) představující vhodné plochy střech, které jsou navíc rozlišeny podle typu na ploché a vhodně skloněné. Vzhledem k velikosti území mapa nezobrazuje celou čtvrt', ale jen její vybraný výřez, který byl vybrán tak, aby byl dostatečně čitelný a zároveň optimální pro tisk ve formátu A4 (Příloha 6).

Druhý vytvořený model vychází z výstupu prvního a slouží k určení výkonu zkoumaného území za předpokladu, že by všechny vymezené plochy byly pokryty fotovoltaickými panely. Model počítá zvlášť výkon pro ploché a zvlášť pro ideálně skloněné střechy, což je důvod jejich rozlišení v Příloze 6. Jak už ale bylo řečeno v metodice, model zanedbává některé faktory, které mohou ovlivnit celkový výkon, a proto musíme počítat s tím, že reálné množství vyrobené energie bude o několik procent nižší, než predikuje výsledek. I přesto může být model dobrým pomocníkem při rozhodování o

investici do fotovoltaiky. Výsledkem modelu je opět vektorová vrstva celého Karlína, jejíž výřez byl zpracován do mapové podoby (Příloha 7). Jelikož není důležitá jen maximální hodnota vyrobené energie, ale i její roční rozložení (hlavně u systémů, které jsou zcela závislé na vlastní vyrobené energii), byl model použit pro vytvoření 12 vektorových vrstev představující intenzitu slunečního záření pro každý měsíc roku 2012, z kterých byla následně vybrána vrstva s nejvyšším (červen) a nejnižším (prosinec) vyrobeným výkonem. Ostatní shapefile byly přiloženy k možnému nahlédnutí na CD. Důležité je říci, že vrstvy nepokrývají celé území, ale jde jen o jeho výřezy. K tomu kroku bylo přistoupeno kvůli vysoké časové náročnosti tvorby jednotlivých výstupů. Jelikož do modelu vstupoval zmenšený DSM, bylo vybráno takové místo, aby bylo co nejvíce vyloučeno možné zastínění okolním terénem (hlavně vrchem Vítkov). Při pohledu na oba zkoumané měsíce je zajímavé, že malé plochy s nízkým potenciálním výkonem v červnu vyrobí stejné množství energie jako velké instalace v prosinci. Měsíce s největším a nejmenším množstvím dopadajícího slunečního záření ukazují Přílohy 8 a 9. Vymezení měsíční změny a s tím i období s nejnižším a nejvyšším výkonem je dalším faktorem posuzující vhodnost využití dané střechy. Ze střech s podobným ročním výkonem je pro instalaci zaměřenou na vlastní spotřebu energie výhodnější ta, která má menší produkční výkyvy. Na rozdíl od instalací, které veškerou vyrobenou energii prodávají do rozvodné sítě. Pro něž je tento faktor nepodstatný a záleží jen na celkové roční produkci.

Posledním, dá se říci nejvíce orientačním modelem je model výpočtu návratnosti, který vychází z výsledků obou předešlých modelů. Návratnost je opravdu jen velmi hrubým ukazatelem, protože při jejím výpočtu není zahrnuta ztráta účinnosti s postupným stárnutím panelu a oscilace množství dopadajícího slunečního záření během jednotlivých let. Navíc tím, že do modelu vstupují výsledky vytvořené předešlými modely, může přejímat spolu se vstupními daty i jejich možné nepřesnosti. Návratnost instalace se na zvoleném území při zadaných parametrech (viz metodika) pohybuje v rozmezí od jednoho do deseti let. Tyto hodnoty závisí na ročním výkonů vymezené plochy a velikosti instalace. Návratnost potenciální instalace je k nahlédnutí v Příloze 10.

Výsledná vizualizace všech třech hlavních výstupů, tedy mapy vhodnosti umístění, výkonu a návratnosti jsou vytvořeny tak, aby čtenář při jejich prohlížení mohl jednotlivé parametry jednoduše posuzovat a kombinovat. Postupným použitím modelů byly vytvořeny 2 shapefile obsahující všechna vypočtená data pro celou oblast Karlína, které byly uloženy jako příloha na přiložené CD.

KAPITOLA 5

Diskuse a závěr

5.1 Diskuse

Základní stavební prvkem práce je digitální model povrchu (DSM). Původně měla být práce založená na využití 3D modelu zástavby, jako tomu je v pracích jiných autorů zabývajících se problematikou fotovoltaického potenciálu střech budov a až z něj měl být spojením digitálního modelu zástavby s digitálním modelem terénu vytvořen digitální model povrchu. Plánovaný postup se ale z důvodu nepoužitelnosti 3D modelu Prahy pro jakoukoliv prostorovou analýzu v prostředí GIS nezdařilo realizovat.

Metodický postup vychází, stejně jako v jiných pracích, z analýzy třech hlavních parametrů a to sklonu, orientace a zastínění střech, které jsou v práci přesně definovány. Parametry jsou nastaveny tak, že se snaží stanovit jen ty plochy, které jsou nejvhodnější k instalaci. Jejich rozumným rozšířením by bylo ale možné stanovit i plochy střech, které sice nebudou maximálně výhodné, ale investice do případné instalace by se stále vyplatila. Na druhou stranu je ale otázkou, jak moc mohou být tyto intervaly posunuty. Tato hranice je podle mého názoru přímo závislá na přírodních podmínkách, takže v oblastech s vysokou intenzitou dopadajícího záření může být vymezena šířeji. Následná aplikace metod vedoucí k výsledku je v dostupných pracích velice odlišná a je vyjádřena spíše matematickými výpočty, než praktickým použitím dostupných nástrojů GIS. Takže porovnání vytvořeného algoritmu s jiným možným postupem je prakticky nemožné. Je však jasné, že docílení stejného výsledku lze dosáhnout i použitím jiných nástrojů a postupů a to i v rámci jednoho programu GIS. Sled použitých nástrojů byl volen tak, aby byl co nejjednodušší, což samo o sobě eliminuje možnost případné chyby při výpočtu.

Kromě přesnosti digitálního modelu povrchu, je důležité stanovení intenzity slunečního záření. V práci byl použit nástroj Area solar radiation, který na rozdíl od konkurenčního nástroje r.sun pro nekomerční GRASS GIS zanedbává při výpočtu odražené sluneční záření, proto může být na místě obava z jeho nedostatečné přesnosti, která by mohla snížit kvalitu výsledku. Porovnáním vypočtené intenzity slunečního záření pro rok 2012 s průměrnou roční intenzitou pro území Prahy uvedenou v práci Cihelky (2004) bylo zjištěno, že vypočtená intenzita se od intenzity průměrné liší jen minimálně.

Při hodnocení přesnosti modelu vhodných ploch se ukázalo, že nástroj v několika případech vymezil i polygony, které jsou v určitou dobu roku alespoň na chvíli zastíněny, což by mohlo být překážkou případné instalace. Jelikož se skoro ve většině případů jednalo o plochy, které jsou zastíněny reliéfem, toto zjištění by nemělo mít výrazný podíl na celkové vhodnosti využití střechy, jelikož se ve městě vyskytuje málo členitý reliéf. Hypotézu potvrzuje i prozkoumání vzorového území, ale pro její ověření by bylo na místě aplikovat metodu i na jiné lokality a výsledky porovnat. Protože jsou stíny na území jen několik dní v roce a to ještě ani ne celý den, myslím, že na celoročním provozu solární elektrárny, v němž je elektrárna jen doplňkovým zdrojem konvečních zdrojů energie, můžeme jejich přítomnost zanedbat. Zajímavé by bylo porovnat reálnou celkovou roční produkci energie na obou těchto plochách, protože už při zastíněním 2 vodorovných řad PV článků panelu se jeho výkon snižuje na 20 %, ale při postupném ustupování stínu by naopak docházelo k pozvolnému nárůstu vyrobeného výkonu. I přes to, že je plocha střech shledána PV modelem jako vhodná, nemusí být instalace nakonec realizovatelná z důvodu nedostatečné nosnosti střechy, se kterou model nepočítá. Plocha vhodných střech může být také ovlivněna okolní vegetací, kterou model kvůli jejímu nezahrnutí v DSM zanedbává. Další slabinou modelu je v tuto chvíli rozdílné stáří digitálního modelu povrchu a 3D modelu Prahy, čímž jsou z modelu odmaskovány některé vhodné plochy k instalaci. Tento problém lze jednoduše vyřešit získáním novější verze 3D modelu. Avšak i přes tyto nepřesnosti je PV model pro určení hodnocení potenciálu střech přesnějším nástrojem, než volně použitelné webové aplikace, které při výpočtu nezohledňují možné zastínění povrchu.

Zbylé dva vytvořené modely jsou spíše jen orientačními ukazateli dokreslující fotovoltaický potenciální vymezených ploch. Tento fakt je způsoben hlavně jejich zjednodušením a nezahrnutím některých parametrů, o kterých se všeobecně ví, ale jejichž určení je velmi složité. Patří mezi ně snižující se účinnost se zvyšující se teplotou panelu u modelu určující výkon a snižující se návratnost s postupujícím stářím panelu. I přes to

mohou být získané výsledky platným ukazatelem (hlavně z modelu pro výpočet potenciálního výkonu) při rozhodování o případném realizování budoucí investice.

Výsledky práce splňují předem určené cíle stanovené v zadání a jednoznačně potvrzují vhodnost využití GIS při hodnocení fotovoltaického potenciálu budov. Jediným nedostatkem práce je fakt, že celý postup nelze plně automatizovat, tedy spojit vytvořené 3 modely v jeden, proto musí být jednotlivé výstupy z jednoho modelu do modelu následujícího vkládány uživatelem. Na druhou stranu rozdělení nástrojů rozšiřuje variabilitu jejich využití.

5.2 Závěr

Hlavním výsledkem práce je algoritmus vytvořený nástroji programu ArcGIS, který slouží k vymezení potenciálního fotovoltaického využití střech. Algoritmus byl pro jednodušší použití poskládan v nástroji ModelBuilder v jeden celek. Mimo něj jsou dalším výstupem práce ještě dva další modely sloužící k orientačnímu výpočtu výkonu a návratnosti investice. Vytvořené modely byly následně aplikovány na oblast Prahy 8, Karlín. Výsledkem aplikace je v první řadě databáze, obsahující informace o poloze a velikosti vhodných ploch střech, intenzitě dopadajícího slunečního záření, výkonu, ročního zisku z instalace a návratnosti. Zajímavé části území byly pro lepší názornost převedeny do mapové podoby

Celkově bych náplň a problematiku práce zhodnotil jako velice zajímavou. Největší časový úsek zabralo vymyšlení metodického postupu, seznámení se s dostupnými nástroji a následná realizace fungujících modelů, při které byly řešeny občasné problémy s použitím jednotlivých nástrojů. Problémy šly většinou vyřešit vyhledáním daného problému v nápovědě programu, či na stránkách výrobce. Jediným výrazným zádrhelem byla práce s 3D modelem Prahy. Samotná aplikace modelů na čtvrt' Karlín byla díky sestaveným ModelBuilderům velmi jednoduchá, ale kvůli velkému území časově náročná. Největším přínosem práce je samotné vytvoření fungujícího nástroje pro určení fotovoltaického potenciálu střech na území Prahy. Dle mých zjištění, touto problematikou se totiž zatím žádná práce v České republice nezabývala. Úspěšným realizováním se navíc potvrdil potenciál využití GIS v tomto oboru. V práci byl dále použit nástroj Area solar radiation, jenž nebyl odzkoušeným pro práci na území Prahy, a proto byla jednoduchou analýzou potvrzena přesnost jeho výpočtu. Přínosem je také zjištění, že 3D model Prahy vytvořený Útvarem hlavního města Prahy má omezení ve využitelnosti v prostorových analýzách.

Vymezení vhodných ploch je jako u každého modelu jen teoretické, a i když byla jeho přesnost posouzena jako dostačující, mohou se teoretické výpočty lišit od reality. Proto se nabízí jako námět další práce posouzení vypočtených dat s reálnými daty naměřenými na již realizovaných PV instalacích. Při velkých rozdílech lze modely upravit a následně pomocí webových nástrojů GIS nabídnou pro použití široké veřejnosti.

SEZNAM ZDROJŮ INFORMACÍ

ARCGIS HELP LIBRARY. *Nápověda program ArcGIS* [online]. Esri. [cit. 2012-16-05]. Dostupné z: <<http://www.esri.com/software/arcgis/eval-help/arcgis9.html>>.

BAŘINKA, R. 2003. Postupný rozvoj využití sluneční energie fotovoltaickou technologií. In: MOTLÍK, J ... [et al.] (eds). *Obnovitelné zdroje energie a možnosti jejich uplatnění v České republice*. Praha : ČEZ, 2003, s. 95–112.

BERANOVSKÝ, J. 2000. Metody hodnocení vhodnosti a výtěžnosti OZE pro účely energetických bilancí a energetické statistiky a pro účely regionálního územního plánování a energetických generelů. Praha : EkoWATT, 2000. 131 s.

BURROUGH, P. A. ; MCDONELL, R. A. 1998. Principles of geographical information systems. 2. vydání. New York : Oxford University Press, 1998. 190 s. ISBN 0198233655.

CASTRO, M. ... [et al.]. 2005. Grid-connected PV buildings: analysis of future scenarios with an example of southern Spain. *Solar Energy*. 2005, ročník 79, číslo 1, s. 86–95.

CHAVES, A. ; BAHILL, A. T. 2010. Locating sites for photovoltaic solar panels. *ArcUser*. Esri, 2010, s. 24 – 28.

CHOI, Y. ... [et al.]. (2011) PV Analyst: Coupling ArcGIS with TRNSYS to assess distributed photovoltaic potential in urban areas. *Solar Energy*, 2011, ročník 85, s. 2924–2939.

CIHELKA, J. 1994. Solární tepelná technika. 1. vydání. Praha : T. Malina, 1994, 203 s. ISBN 80-900759-5-9.

CZECH RE AGENCY. *Fotovoltaika – kolik je možno ještě nainstalovat* [online]. [cit. 2012-10-05]. Dostupné z: < <http://www.czrea.org/cs/druhy-oze/fotovoltaika/fv-kolik-jeste-mozno-instalovat>>.

ČAPEK, R. 2001. *Matematická geografie*. 2. vydání. Praha : Karolinum, 2001. 85 s. ISBN 80-246-0223-7.

DUBAYAH, R. ; RICH, P. M. 1995. Topographic solar radiation models for GIS. *International Journal of Geographical Information Systems*. 1995, ročník 9, s. 405–419.

DUNLOP, J. P. 2009. *Photovoltaic Systems*. 2. vydání. Illinois : American Technical Publishers, 2009. 464 s. ISBN 0826912877.

ENERGETICKÝ REGULAČÍ ÚŘAD. 2011. *Cenové rozhodnutí Energetického regulačního úřadu č. 7/2011 ze dne 23. Listopadu 2011, kterým se stanovuje podpora pro výrobu elektřiny z obnovitelných zdrojů energie, kombinované výroby elektřiny a tepla a druhotných energetických zdrojů*.

ENERTEC SOLUTIONS. *Úvod do problematiky*. [online]. [cit. 2012-16-05]. Dostupné z: <<http://www.enertec.cz/teorie>>.

ESRI. 2010a. Boston showcases solar power potential with web GIS. *GIS for renewable energy*. 2010, s. 15–18.

ESRI. 2010b. Mapping the solar potential of rooftops. *GIS for climate change*. 2010, s. 31–33.

FEJFAR, A. 2004. Historie a perspektivy fotovoltaických článků pro využití sluneční energie. In: *Sborník z XII. semináře o filozofických otázkách matematiky a fyziky*. Velké Meziříčí, 2004, s. 70–80.

FU, P. 2000. A Geometric solar radiation model with applications in landscape ecology. Kansas : University of Kansas. 2000.

FU, P. ; RICH, P. M. 2000. The solar analyst 1.0 Manual. Helios environmental modeling institute (HEMI), USA, 2000.

FU, P. ; RICH P. M. 2002. A geometric solar radiation model with applications in agriculture and Forestry. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2002, ročník 37, s. 25–35.

GEVORKIAN, P. 2010. Alternative energy systems in building design. New York : McGraw-Hill, 2010. 522 s. ISBN 978-0-07-162147-2.

HOFIERKA, J. ; KAŇUK, J. 2009. Assessment of photovoltaic potential in urban areas using open source solar radiation tools. *Renewable Energy*. 2009, ročník 34, s. 2206–2214.

HOFIERKA, J. ; ŠÚRI, M. 2002. The solar radiation model for Open source GIS: implementation and applications. In: *Proceedings of the Open source GIS - GRASS users conference 2002*. Trento, 2002, 19 s.

HUANG, S. ... [et al.]. 2009. Modeling small areas is a big challenge. *ArcUse*. Esri, 2009, s. 28–31.

HUTCHINSON, M. F. ... [et al.]. 1984. Estimating monthly mean values of daily total solar radiation for Australia. *Solar Energy*. 1984, ročník 32, s. 277–290.

IZQUIERDO, S. ; RODRIGUES, M. ; FUEYO, N. 2008. A method for estimating the geographical distribution of the available roof surface area for large-scale photovoltaic energy-potential evaluations. *Solar energy*. 2008, ročník 82, s. 929–939.

LIBRA, M. ; POULEK, V. 2006. Solární energie, fotovoltaika : perspektivní trend současnosti a blízké budoucnosti. 2. vydání. Praha : ČZU, 2006. 149 s. ISBN 80-213-1488-5.

LIBRA, M. ; POULEK, V. 2009. Fotovoltaika : teorie i praxe využití solární energie. 1. vydání. Praha : ILSA, 2009. 160 s. ISBN 978-80-904311-0-2.

LIMBERK, O. 2009. Solární energetika v České republice. Praha : ČVUT, 2009. 10 s.

NAZELENO.CZ. *Jak zprovoznit domácí solární elektrárnu?* [online]. [cit. 2012-10-05]. Dostupné z:<<http://www.nazeleno.cz/energie/fotovoltaika/jak-zprovoznit-domaci-solarni-elektrarnu.aspx>>.

NETOPIL, P. ... [et al.]. 1984. Fyzická *Environmental observer* geografie I. 1. Vydání. Praha : Státní pedagogické nakladatelství, 1984. 272 s.

NOIA, M. ... [et al.]. 1993. Solar irradiance estimation from geostationary satellite data: I. Statistical models. *Solar Energy*. 1993, ročník 51, s. 449–456.

- RICH, P. M. ... [et al.]. 1994. Using viewshed models to calculate intercepted solar radiation: applications in ecology. *American society for photogrammetry and remote sensing technical papers*. 1994, s. 524–529.
- RICH, P. M. ; FU, P. 2000. Topoclimatic habitat models. In: *Proceedings of the fourth international conference on integrating GIS and environmental modeling*. 2002.
- SANTOS, T. ... [et al.]. 2011. Solar potential analysis in Lisbon using LiDAR data. In: *31st EARSeL Symposium and 35th General Assembly 2011*, Lisabon, 7 s.
- SHIELDS, B. 2011. California sunshine is an energy goldmine. Esri. 2011, s. 1-3.
- SRDEČNÝ, K. 2009. Fotovoltaika v budovách. Praha : EkoWATT, 2009. 39 s.
- SRDEČNÝ, K. ; BERANOVSKÝ, J. 2010. Energie slunce : výroba energie. Praha : EkoWAT, Centrum pro obnovitelné zdroje a úspory energie, 2010, 2 s.
- ŠÚRI, M. 2002. Modelovanie a kartografické zobrazovanie globálneho záření. In: *Aktivity v kartografii 2002 - zborník referátov zo seminára*. Bratislava : Kartografická spoločnosť SR a Geografický ústav SAV, 2002, 4 s.
- ŠÚRI, M. ; HOFIERKA, J. 2004. A new GIS-based solar radiation model and its application to photovoltaic assessments. *Transactions in GIS*. 2004, ročník 8, s. 175–190.
- ŠÚRI M. ... [et al.]. 2005. PV-GIS: a web based solar radiation database for the calculation of PV potential in Europe. *International Journal of Sustainable Energy*. 2005, ročník 24, s. 55–67.
- ŠÚRI, M. ... [et al.]. 2007a. Potential of solar electricity generation in the European union member states and candidate countries. *Solar Energy*. 2007, ročník 81, s. 1295–1305.
- ŠÚRI, M. ... [et al.]. 2007b. Solar resource modelling for energy applications. In: *PECKHAM, R. ; JORDAN, G. (eds.) Digital terrain modelling, development and applications in a policy support environment*. Berlín : Heidelberg, 2007, s. 259–273.
- ŠÚRI M. ... [et al.]. 2005. PV-GIS: a web based solar radiation database for the calculation of PV potential in Europe. *International Journal of Sustainable Energy*. 2005, ročník 24, s. 55–67.

THEMEßL, A. ; WEIß, W. 2003. Svépomocné solární systémy : příručka projektování a stavby solárních systémů. Podolí u Brna : Ekologický institut Veronica, Podolí, 2003. 61 s.

ÚŘAD ROZVOJE HLAVNÍHO MĚSTA PRAHY (2012a). *Digitální model zástavby a zeleně* [online]. [cit. 2012-16-05]. Dostupné z: <<http://www.geoportalpraha.cz/cs/clanek/6/3d-model-digitalni-model-zastavby-a-zelene>>.

ÚŘAD ROZVOJE HLAVNÍHO MĚSTA PRAHY (2012b). *Digitální model povrchu* [online]. [cit. 2012-16-05]. Dostupné z: <<http://www.geoportalpraha.cz/cs/clanek/71/qd-digitalni-model-povrchu>>.

ÚŘAD ROZVOJE HLAVNÍHO MĚSTA PRAHY (2012c). *Limity využití území – georeport* [online]. [cit. 2012-16-05]. Dostupné z: <<http://wgp.urm.cz/limity/>>.

VYKYDAL, L. 2010. SOLYNDRA : nová generace fotovoltaických panelů pro ploché střechy. *Stavební a investorské noviny*. 2010, s. 18 –19.

ŽEŇKA, M. ; TYWONIAK, J. ; STANĚK, Kamil. (2007). Solární systémy a budova : architektonicko-stavební pohled. In: Solární systémy s FV/FT panely a jejich využití : Sborník příspěvků z odborného semináře. Praha : Czech RE agency, s. 7–8.

SEZNAM PŘILOŽENÝCH PŘÍLOH

Seznam tištěných příloh

Příloha 1	Modelbuilder pro výpočet vhodných ploch střech
Příloha 2	ModelBuilder pro výpočet výkonu (kWh)
Příloha 3	ModelBuilder pro výpočet návratnosti (roky)
Příloha 4	Porovnání výsledných polygonů s vrstvami osvitu povrchu
Příloha 5	Porovnání vstupních rastrů s výslednou vrstvou
Příloha 6	Vhodné plochy střech pro umístění panelů
Příloha 7	Potenciální roční výkon vhodných střech
Příloha 8	Potenciální největší měsíční výkon vhodných střech
Příloha 9	Potenciální nejmenší měsíční výkon vhodných střech
Příloha 10	Orientační návratnost investice do fotovoltaiky

Seznam elektronických příloh

Příloha 1	PV analýza.tbx
Příloha 2	vhodne_plochy.shp
Příloha 3	vykon_navratnost.shp
Příloha 4	vykon_mesice.gdb
Příloha 5	Elektronická verze práce